

雲による信号減衰率を考慮した 光衛星通信用地上局配置方法の検討

山納 大弥[†], 石原 進[†], Thanh V. Pham[†]

[†] 静岡大学 工学部 数理システム工学科

1 はじめに

衛星通信のための光無線通信は、近年ますます注目されている [1]. これは、無線周波数通信に比べて、光無線通信は高いデータレート伝送、免許不要のスペクトル、および低重量のトランシーバを提供できるためである。しかし、光衛星通信の展開には、いくつかの課題があり、その中で雲による衛星-地上リンクの遮断は重要な懸念事項と考えられる。

雲による衛星-地上リンクの遮断は光衛星通信システムの性能と可用性を著しく低下させる可能性があるため、光衛星通信用地上局 (以下、光地上局) 間でサイトダイバーシティを組むことで、いずれかの光地上局で衛星-地上リンクを維持する必要がある [2]. 図 1 にサイトダイバーシティを組み込んだ光地上局ネットワークの概念図を示す。

既存の研究では、サイトダイバーシティの実現を目指し、衛星画像を用いて雲の有無を分析し、雲の存在確率や地点間の雲量の相関を求めることで、光地上局の数と配置の候補を示している [3]. しかし、この手法は雲の存在の有無のみを考慮して光地上局の配置を決定しており、雲水量の変化に応じた衛星-地上リンク間の信号減衰率を考慮していない。

本稿では、雲の有無だけでなく衛星-地上リンク間の光信号強度を考慮したサイトダイバーシティを実現するため、雲水量による光衛星通信の信号減衰率にもとづいて光地上局の配置方法を検討した。さらに、その手法に基づいた光地上局の配置における衛星-地上リンク間の雲による信号減衰率を評価した。

2 光衛星通信用地上局の配置

2.1 雲による信号減衰率の計算方法

光衛星通信の衛星-地上リンクの雲による信号減衰率を計算する。光衛星は各光地上局配置検討地点の垂直方向の上空にあるものとする。

A Study of Ground Station Placement Method for Optical Satellite Communications Considering Signal Attenuation due to Clouds

Hiroya YAMANO[†], Susumu ISHIHARA[†], and Thanh V. PHAM[†]

[†]Department of Mathematical and Systems Engineering, Shizuoka University

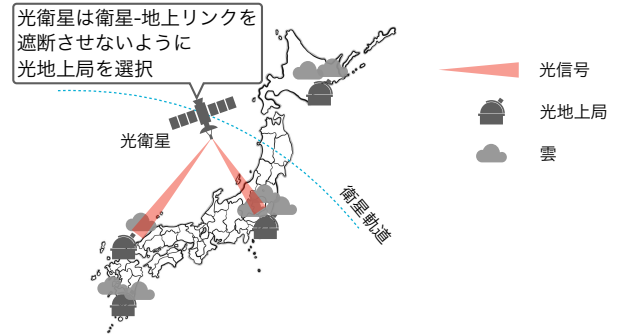


図 1: 光衛星地上局ネットワーク

表 1: a, b, γ のパラメータ [4]

雲の高さ V [km]	a	b	γ
$V > 2.5$	3	0.5	1
$2.5 \geq V > 1.4$	3	0.5	1
$1.4 \geq V > 0.7$	2	0.425	1
$0.7 \geq V$	2	0.6	1

各地点の雲を通過するときの光信号減衰率 $A(\lambda)$ は、

$$A(\lambda) = \int_{l_0}^{l_{\max}} \beta_{\text{ext}}(\lambda) dl \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

で与えられる [4]. ここで、 $\beta_{\text{ext}}(\lambda)$ は体積吸光係数であり、光波長 λ に依存する。 $l_{\max}$ と l_0 はそれぞれ雲が存在可能な上限と下限の高度である。体積吸光係数は

$$\beta_{\text{ext}}(\lambda) = 4.343 \times 10^3 \int_0^\infty \sigma_{\text{ext}}(r, \lambda) \times n(r) dr \quad [\text{dB/km}] \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $\sigma_{\text{ext}}(r, \lambda)$ は吸光係数、 r は雲粒の半径である。 $n(r)$ は雲粒の粒度分布であり、

$$n(r) = g \times r^a \times \exp(-b \times r^\gamma) \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 a, b, γ は雲の高さによって決定されるパラメータであり表 1 に示す。また、 g は

$$g = \frac{3 \times \gamma \times b^{a+4/\gamma} \times w}{4 \times \pi \times \rho_w \times \Gamma((a+4)/\gamma)} \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 w は雲水量、 ρ_w は水の密度、 $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数である。

2.2 光衛星通信用地上局の配置

式 (1)-(4) を用いて日本陸上での信号減衰率を求め、光地上局の配置位置を検討した。光衛星通信には波長

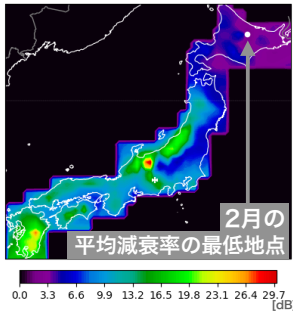


図 2: 2 月の平均減衰率



図 3: 光地上局の候補

1600 nm を使用すると仮定した。また、信号減衰率の計算には ERA-interim のデータベースから入手した [5], 2019 年から 2021 年までの 3 年間の雲水量データ (時間解像度は 1 時間, 空間解像度は緯度 0.25 度, 経度 0.25 度) を使用した。

日本陸上のすべての地点で光地上局の配置を検討すると計算量が大きすぎるため, 光地上局の配置箇所を絞った。入手した雲水量データを用いて月ごとに 3 年分の平均信号減衰率を求め, 平均信号減衰率が最も低い地点を光地上局の配置地点の候補とする。例えば, 2 月の場合, 平均減衰率の計算結果を図 2 に示し, 光地上局の配置地点の候補を白い点で表す。入手した雲水量データを用いて各月ごとに平均信号減衰率を求めた結果, 1 月と 2 月, 3 月と 12 月の平均信号減衰率が最も低い地点がそれぞれ同じになったため, 10 地点を候補とした。また, 10ヶ所の主要都市も光地上局の配置地点の候補とした。さらに, すでに長野県伊那市にある光地上局も追加し, 候補の 20 地点と既存の光地上局から, 光地上局配置地点を選択する。光地上局の配置地点の候補である各月の平均減衰率の最低地点, 日本の都市, 既存の光地上局をそれぞれ赤い点, 青い星, 黒い三角として図 3 に示す。

候補の 20 地点から選択した地点と既存の光地上局から, 光地上局ネットワークを構築する光地上局配置地点の集合を求めた。各配置数における光地上局配置地点の集合を決定する方法は, すべての組み合わせを計算する方法があるが計算量が大きすぎるため, 貪欲法を用いて求めた。貪欲法では, 既に選定した光地上局配置地点の集合を固定し, 雲による信号減衰率の最大値を最小にする光地上局を求め, 光地上局配置地点の集合に追加することで結果の光地上局配置地点の集合を求めた。

各時刻において光衛星と通信する光地上局は, 選定した光地上局配置地点の集合で雲による信号減衰率が最も低い光地上局とする。時刻 t で光衛星と通信する光地上局の信号減衰率 I_t は以下の式で決定した。

$$I_t = \min_i A_{t,i}(\lambda) \quad \forall i \in N \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

ここで, N は光地上局配置地点の集合, $A_{t,i}$ は時刻 t ,

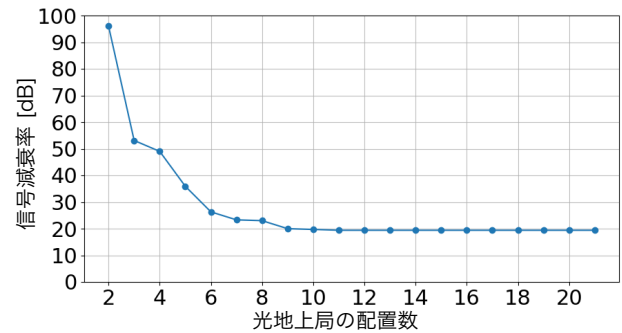


図 4: 光地上局の配置数と雲による信号減衰率の最大値

地点 i での信号減衰率である。式 (5) と 2021 年の雲水量データを用いて, 選定した光地上局配置地点の集合での雲による信号減衰率の最大値を求めた。

2.3 計算結果

図 4 は, 光地上局の配置数と雲による光衛星通信の信号減衰率の最大値の関係を推移を表したものである。光地上局の配置数が 11 地点以上では雲による信号減衰率の最大値は 19.4 dB に収束していることがわかる。

距離が近い候補の地点が存在し, そのような候補の地点同士は同じような信号減衰率になっている。また, 瀬戸内海や東北地方の太平洋側のような地域では, 距離が離れている地点でも同じような信号減衰率になっている。これが光地上局の配置数が 11 地点以上で雲による信号減衰率の最大値が収束した原因と考えられる。

3 まとめ

衛星-地上リンク間の光信号強度を考慮したサイトダイバーシティを実現するため, 雲の有無だけでなく, 雲水量によって変化する光衛星通信の信号減衰率に基づいて, 日本陸上の光地上局の配置地点の候補を決定した。光地上局の配置地点の候補を用いて信号減衰率が低くなる光地上局配置地点の集合を選定し, 評価した。今後は, 光地上局ネットワークの構築にかかるコストも考慮した光地上局の配置方法を検討する。

参考文献

- [1] 豊嶋守生, 宗正康光, “衛星通信の最新動向と今後の展望”, 電子情報通信学会誌, vol. 102, no. 12, pp. 1089–1094 (2019).
- [2] 向井達也, 高山佳久, 尾上孝史, “宇宙-地上間の高速光通信に必要な雲回避型ネットワーク-宇宙光直接通信技術”, 信学技報, vol. 121, no. 262, pp. 13–17 (2021).
- [3] C. Fuchs, F. Moll, “Ground station network optimization for space-to-ground optical communication links”, *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 12, pp. 1148–1159 (2015).
- [4] N. K. Lyras, C. I. Kourogorgas and A. D. Panagopoulos, “Cloud Attenuation Statistics Prediction From Ka-Band to Optical Frequencies: Integrated Liquid Water Content Field Synthesizer”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 1, pp. 319–328 (2017).
- [5] ECMWF, “ERA-interim database,” <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview>